

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

9-87-768

Б.В.Василишин, В.И.Волков, И.И.Куликов

**ИНТЕРАКТИВНАЯ ПРОГРАММА
РАСЧЕТА КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ
ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
НА ЭВМ СМ-4**

1987

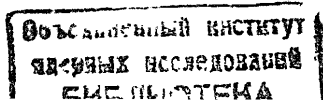
Для расчета каналов транспортировки заряженных частиц в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ создано несколько интерактивных программ с оперативным представлением результатов в графическом виде, например, для ЕС-1010^{/1,2/} и ЕС-1055^{/3/}. Эти программы позволили существенно увеличить эффективность расчета каналов по сравнению с аналогичными программами на базовых ЭВМ ОИЯИ БЭСМ-6 и CDC-6500^{/4/} за счет введения возможностей диалога и графического представления результатов.

Ввод в эксплуатацию на синхрофазотроне системы каналов в экспериментальном корпусе, создание второго направления медленного вывода, разработка ускорительного комплекса "Нуклотрон" значительно увеличили объем расчетов как по оптимизации режимов транспортировки пучка на действующих каналах, так и по проектированию новых. Для эффективного решения указанных задач необходимы широкие вычислительные возможности, большой набор услуг по отображению, хранению и документированию информации, оперативность расчетов. Написанные ранее программы далеко не в полной мере удовлетворяли этим требованиям. Оптимальным образом, на наш взгляд, указанные факторы сочетаются в системе расчета каналов, созданной на базе центральной ЭВМ ускорительного комплекса синхрофазотрона СМ-4. По сравнению с программами, описанными в^{/1-3/}, созданная имеет ряд дополнений, основными из которых являются возможность задания начальных условий в произвольной точке канала с целью расчета в обоих направлениях, учет ошибок параметров элементов канала, расширение возможностей режимов оптимизации и диалога, организация банков данных о структурах рассчитанных каналов и характеристиках пучка на магнитном диске.

КОНФИГУРАЦИЯ ЭВМ

Реализация всех предусмотренных возможностей программы требует следующих характеристик и набора внешних устройств, входящих в состав ЭВМ СМ-4:

- процессор "Электроника 100-25";
- оперативное запоминающее устройство емкостью 248К байт;
- магнитный диск МЕРА-9450 емкостью 2x2,5 Мбайт;
- алфавитно-цифровой дисплей;



- операционная система RSX-11/M;
- графопостроитель MP1000;
- крейт КАМАК, подключенный к ЭВМ СМ-4 через крейт-контроллер типа 106А /ПОЛОН, ПНР/;
- кнопочная панель, подключенная к ЭВМ через входной регистр типа 321 /ПОЛОН, ПНР/;
- цветной телемонитор с разрешением 512x256 растровых точек;
- алфавитно-цифровое печатающее устройство.

Минимальная конфигурация ЭВМ, позволяющая выполнять все необходимые расчеты, приводящая, однако, к потере соответствующих удобств в процессе их реализации, включает из вышеприведенного списка первые четыре устройства и операционную систему RSX. При этом отсутствуют возможности быстрой и удобной подачи запросов на выполнение операций с кнопочной панели, оперативного представления результатов расчета на экране цветного монитора в удобной графической форме, документирования результатов в алфавитно-цифровом и графическом виде.

ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММЫ

В качестве входных данных программы задаются параметры, описывающие структуру канала транспортировки, и характеристики пучка в начальной точке системы.

Структура канала определяется 11 массивами:

1. NE(1) - число элементов канала, $NE \leq 50$ /здесь и далее в скобках указывается размерность соответствующего массива/.
2. ID(50) - массив идентификаторов элементов. В этом массиве приняты следующие обозначения: 0 - свободное пространство, 1 - квадрупольная линза, 2 и 3 - дипольные магниты соответственно для горизонтального и вертикального поворотов /продольная ось канала совпадает с осью пучка/, 4 - бамп-магниты для горизонтального /значение поля задается в массиве FI(50)/ и вертикального (GR(50)/ отклонений орбиты пучка от оси канала.
3. IP(50) - массив числа разбиений элементов канала. Расчет характеристик пучка программа производит не только на входе и выходе каждого элемента канала /соответствующее значение IP в этом случае равно 1/, но и в заданном числе точек внутри элемента. Число IP (i) этого массива показывает, на какое число равных отрезков разбивается i-й элемент массива. В реализованном варианте задачи общее число разбиений не должно превышать 50.
4. DL(50) - массив длин элементов канала /в см/.

5. GR(50) - массив градиентов магнитных элементов канала (в Гс/см) или полей для бамп-магнитов при отклонении в вертикальном направлении. Положительный знак градиента соответствует фокусировке в горизонтальной плоскости, а поля бамп-магнита - отклонению орбиты вверх по ходу пучка.

6. FI(50) - массив полей магнитов /в Гс/. Положительный знак поля соответствует повороту вправо по ходу пучка.

7. T1(50) - массив входных краевых углов магнитов /в рад/.

8. T2(50) - массив выходных краевых углов магнитов /в рад/.

9. ER(50) - массив ошибок магнитных элементов канала /ошибки юстировки в горизонтальной (ER(1, i)) и вертикальной (ER(2, i)) плоскости для квадрупольной линзы, ошибки поля (ER(1, i)) и углы перекося ER(2, i) для магнита/.

10. SC(1) - размер полуапертуры канала /в мм/.

11. NP(1) - номер начальной точки канала, $NP = 1 \div 50$.

Характеристики пучка задаются 9 массивами:

1. BR(1) - магнитная жесткость /в Гс.см/.

2. DP(1) - импульсный разброс $\Delta P/p$.

3. DI(K, i) - дисперсия пучка /в см/ в горизонтальной $K=1$ и вертикальной $K=2$ плоскости в i-й точке канала, $i \leq 50$.

4. D1(K, i) - производная дисперсии.

5. AL(K, i) - α -функция.

6. BE(K, i) - β -функция /в см/.

7. XI(K, i) - положение осевой траектории /в см/ /положение орбиты пучка/.

8. X1(K, i) - угол между осевой траекторией и осью канала /в рад/.

9. EM(K) - эмиттанс пучка /в см.рад/.

Выбор необходимого параметра осуществляется на основе соответствующего наименования массива, задаваемого с операторского терминала. Если выбранный параметр характеризуется дополнительными данными /например, номер элемента массива, тип координатной плоскости и т.д./, то их ввод производится в режиме ответов на вопросы ЭВМ.

РАБОТА ПРОГРАММЫ

В работе программы расчета каналов транспортировки можно выделить четыре режима: диалоговый, счетный, режим оптимизации и представления результатов на устройствах отображения. Первые три режима реализуются программой TRANSP, а последний - TVTR. После загрузки и запуска обеих программ TVTR переходит в режим ожидания окончания цикла расчетов, а TRANSP - в диалоговый режим с автоматическим считыванием текущей версии входных данных с диска в оперативную память ЭВМ. На диске для хранения ис-

ходных параметров структуры и пучка специально организован файл, позволяющий хранить исходную информацию 10 различных вариантов /версий/ каналов транспортировки /при необходимости это число можно легко увеличить/. Считывание начальных данных необходимого варианта канала с диска или запись под заданным номером на диск осуществляются в диалоговом режиме по командам RD и WD соответственно. В этом же режиме с данными текущей версии можно выполнить операции удаления информации, характеризующей элемент канала с заданным номером, или резервирования необходимой области памяти для хранения данных заданного элемента канала /соответственно команды DE и IN/. По командам HE, HO и HI можно вывести на экран терминала перечень всех предоставляемых программой услуг, а команда GO переводит программу в счетный режим работы.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА

Вычислительная часть программы, написанной на языке Фортран-4 ЭВМ СМ-4, сводится к определению матриц преобразования элементов канала, по которым рассчитываются во всех заданных точках канала для обеих плоскостей координат значения α -, β - и γ -функций, орбиты, дисперсии и ее производной, огибающих с учетом и без учета дисперсии. Расчет огибающих пучка с учетом осевой траектории выполняется по следующим формулам:

$$E1(K, i) = X1(K, i) + \sqrt{EM(K) \cdot BE(K, i)}$$

и

$$E2(K, i) = X1(K, i) - \sqrt{EM(K) \cdot BE(K, i)} \quad \text{- огибающие без учета дисперсии,}$$

$$E3(K, i) = X1(K, i) + \sqrt{EM(K) \cdot BE(K, i)} + DI(K, i) \cdot DP$$

и

$$E4(K, i) = X1(K, i) - \sqrt{EM(K) \cdot BE(K, i)} - DI(K, i) \cdot DP \quad \text{- огибающие с учетом дисперсии.}$$

По завершении цикла всех расчетов управление передается программе TVTR, которая считывает состояние кнопочной панели и в соответствии с поданными запросами выполняет операции вывода информации на средства отображения.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

В качестве средств представления информации используются АЦ дисплей, печатающее устройство, цветной телевизионный мони-

тор с разрешением 512x256 растровых точек и графопостроитель MP1000 с шестью программно выбираемыми карандашами.

На печать или экран терминала по запросам с кнопочной панели может быть выведена следующая алфавитно-цифровая информация:

- исходные характеристики пучка и параметры структуры канала;
- результаты расчета во всех заданных точках канала;
- результаты расчета каждого цикла итерации при оптимизации.

На устройствах представления графической информации возможно отображение следующей информации:

- результаты расчета β -функции;
- осевая траектория центральной частицы /орбита пучка/;
- график дисперсии пучка;
- огибающие пучка без учета и с учетом дисперсии.

Вывод графиков огибающих и орбиты пучка производится в соответствии с задаваемым в режиме диалога размером полуапертуры канала, а графики β -функции и дисперсии - с масштабированием по максимальным их значениям, выводимым также на экран в числовом виде. Для удобства количественной оценки графиков функций имеются возможности сопровождения графиков горизонтальными масштабными линиями. По желанию оператора можно запретить выдачу осей координат и схематического изображения структуры канала, что часто требуется при выдаче графиков функций, относящихся к одной и той же структуре, но при различных значениях исходных характеристик пучка или некоторых параметров магнитных элементов, например величин градиентов и полей. По запросу с кнопочной панели можно задать фиксированным продольный масштаб, который без специального запроса определяется исходя из суммарной длины канала. Эта возможность бывает удобной при расчете по частям сложных каналов большой протяженности.

Документирование графической информации включает также выдачу в табличном виде числовых значений параметров магнитных элементов - величин градиентов квадрупольных линз и полей магнитов.

По завершении всех операций вывода информации управление снова возвращается программе TRANSP, которая либо переходит в диалоговый режим, либо при наличии соответствующего запроса - в режим оптимизации.

РЕЖИМ ОПТИМИЗАЦИИ

Переход в режим оптимизации целесообразен после определения в общих чертах структуры канала и степени влияния того или иного параметра системы на характеристики пучка, когда даль-

нейший расчет сводится к выполнению вычислителем однотипной последовательности операций по подбору таких параметров системы, при которых с требуемой точностью выполняются условия, наложенные на характеристики пучка. В отличие от предыдущих программ^{/2/}, где в качестве варьируемых величин могли быть только параметры элементов канала /длина свободного промежутка, величины градиента или поля/, в реализованном варианте программы варьируемыми параметрами могут быть также и характеристики пучка в заданных точках. Кроме того, число варьируемых параметров увеличено до 10 и оно необязательно должно быть равно количеству оптимизируемых функций. Уменьшению времени сходимости итерационного процесса способствовало сочетание методов Ньютона и случайного выбора первоначального значения варьируемого параметра, поскольку в этом случае исключается возможность заклинивания программы при вычислении значения функционала в области его локального минимума. Если число оптимизируемых функций равно числу варьируемых параметров и не превышает четырех, то по запросу с кнопочной панели процесс оптимизации можно существенно ускорить за счет введения метода решения системы линейных уравнений. Результаты каждого шага итерации можно контролировать по выдачам на печать или экраны цветного телевизионного монитора и операторского терминала, в зависимости от них вмешиваться в итерационный процесс, корректируя в диалоговом режиме соответствующие параметры системы или вообще останавливая процесс оптимизации.

Перед переходом в режим оптимизации в режиме диалога задаются необходимые условия /в скобках после наименования команды указывается размерность соответствующего массива/:

1. NV(1) - количество варьируемых параметров, NV = 1÷10;
2. NF(1) - количество оптимизируемых функций, NF = 1÷10;
3. IV(10) - список варьируемых параметров. 1 - α -функция, 2 - β -функция, 3 - дисперсия, 4 - производная дисперсии, 5 - орбита, 6 - производная орбиты, 7 - эмиттанс пучка, 8 - длина свободного промежутка, 9 - градиент, 10 - поле;
4. NO(10) - дополнительные данные оптимизируемых параметров. Для параметров 1÷7 в этом массиве числа 1 и 2 означают соответственно горизонтальную и вертикальную плоскости, а для 8÷10 - номер элемента канала;
5. LO(10) - признаки связи для длин элементов. Задаваемое в этом массиве число показывает номер элемента, длина которого изменяется в соответствии с варьируемой длиной так, что их сумма остается постоянной;
6. DO(10) - минимальные приращения значений параметров;
7. PA(10) - максимально допустимые значения варьируемых параметров;

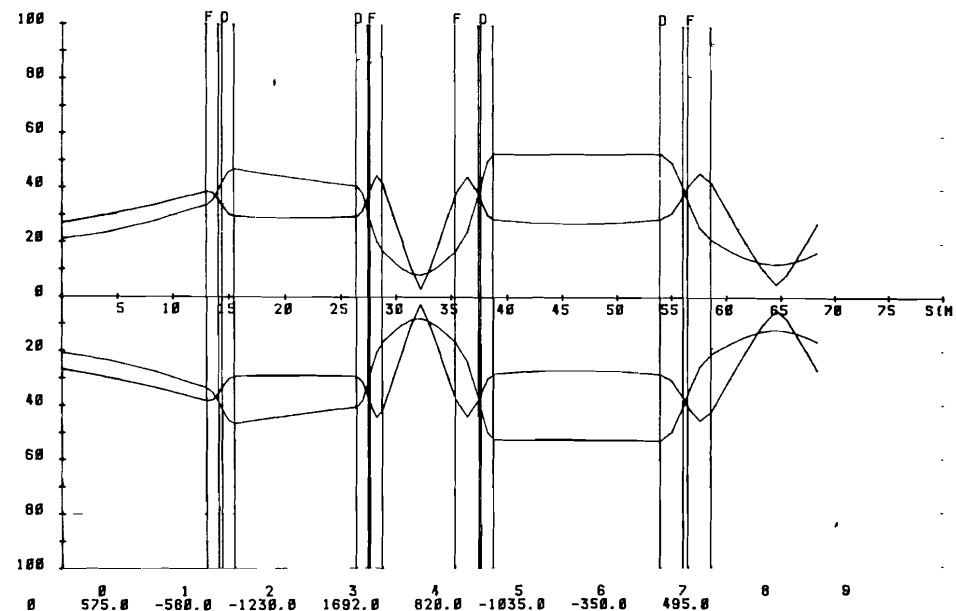


Рис.1. Огибающие пучка в канале ВП-1.

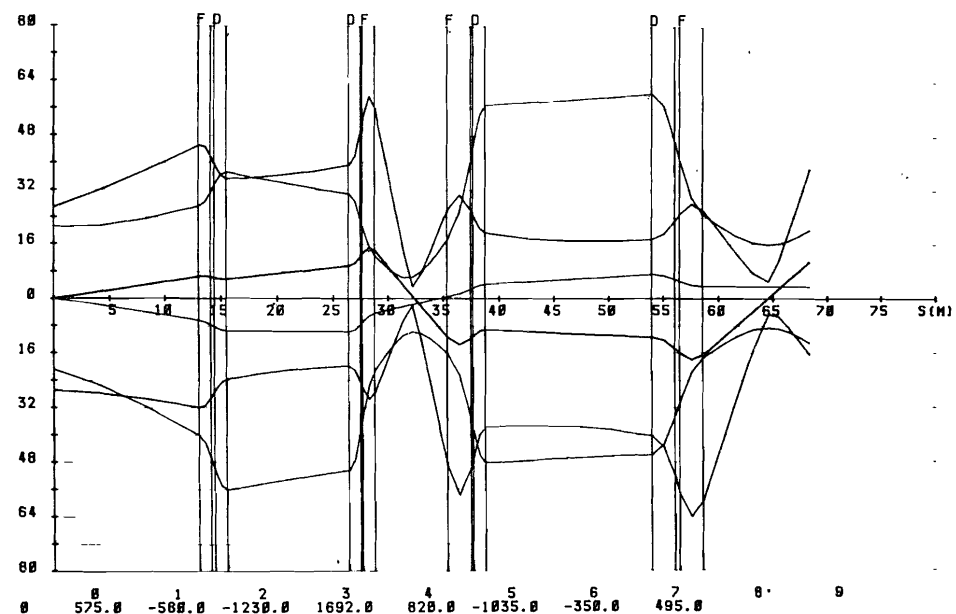


Рис.2. Осевая траектория и огибающие пучка в канале ВП-1. Угол между осевой траекторией и оптической осью канала на входе составляет 2 мрад.

8. P1(10) - минимально допустимые значения варьируемых параметров;
9. JF(10) - список номеров оптимизируемых функций: 1 - α -функция, 2 - β -функция, 3 - дисперсия, 4 - производная дисперсии, 5 - орбита, 6 - производная орбиты, 7 - γ -функция, 8 - E1, 9 - E2, 10 - E3, 11 - E4;
10. JP(10) - признаки координатных плоскостей для оптимизируемых функций: 1 - горизонтальная и 2 - вертикальная плоскости;
11. KO(10) - номера точек канала, в которых необходимо выполнить заданные условия;
12. AO(10) - требуемые значения функций;
13. DF(10) - точности подбора условий;
14. KI(2) - значения аргументов случайных чисел, по которым определяется первоначальная величина варьируемого параметра при повторном запуске программы в режиме оптимизации;
15. PW(10) - веса оптимизируемых функций в функционале /по умолчанию принимаемые равными 1/;
16. WW(10) - начальные значения варьируемых параметров;
17. NI(1) - число печатаемых в каждом цикле итерации значений функций.

ПРИМЕР РАСЧЕТА КАНАЛА

В качестве примеров, иллюстрирующих возможности программы, на рис.1 и 2 показаны варианты расчета участка канала транспортировки пучка в экспериментальный корпус /канал ВП-1/. На рис.1 представлены огибающие пучка в обеих плоскостях /огибающие в горизонтальной плоскости выводятся зеленым цветом, а в вертикальной - красным/ при оптимальной настройке. На рис.2 приведены огибающие и осевая траектория пучка при условии ее несовпадения с оптической осью канала. В настоящее время программа используется для расчета каналов транспортировки пучков в рамках проекта "Нуклотрон". Опыт эксплуатации программы показал ее высокую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василишин Б.В., Волков В.И., Куликов И.И. ОИЯИ, 10-80-169, Дубна, 1980.
2. Василишин Б.В., Волков В.И., Куликов И.И. ОИЯИ, 10-80-497, Дубна, 1980.
3. Брунерс Г.А. и др. ОИЯИ, 9-86-753, Дубна, 1986.
4. Brown K.L. et al. CERN, 73-16, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 октября 1987 года.

Василишин Б.В., Волков В.И., Куликов И.И. 9-87-768
Интерактивная программа расчета каналов
транспортировки пучков заряженных частиц
на ЭВМ СМ-4

Описывается интерактивная программа расчета каналов транспортировки пучков заряженных частиц, созданная на ЭВМ СМ-4 ускорительного комплекса ЛВЭ. Входными данными программы являются структура канала и характеристики пучка в начальной точке. Программа позволяет вычислять огибающие пучка, положение орбиты, α -, β -, γ -функции, дисперсию и ее производную и т.д. Режим оптимизации реализован на основе метода градиентного спуска. Результаты расчета могут выдаваться в графическом виде на цветной телемонитор или графопостроитель и в алфавитно-цифровом виде на экран терминала или печатающее устройство.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.
Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Vasilishin B.V., Volkov V.I., Kulikov I.I. 9-87-768
Interactive Program for Calculating Charged
Particle Beam Transport Channels on SM-4
Computer

Interactive program for calculating charged particle beam transport channels is described. The program has been created on SM-4 computer of High Energies Laboratory accelerator center. As program input data the channel element parameters and beam characteristics in the initial point are given. The program permits to calculate the beam envelopes, orbit position, α -, β -, γ -functions, dispersion and its derivative etc. The optimization mode has been realized by the gradient method. The calculation results can be represented in the graphic form on a colour TV monitor or a plotter and in the alpha-numerical form on a terminal screen or a printer.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1987